

На правах рукописи

ГАЙНЕТДИНОВ Рамиль Рафикович

**ГАЗОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань- 2000

0 718 077 - /



На правах рукописи

ГАЙНЕТДИНОВ Рамиль Рафикович

**ГАЗОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



870086

Казань- 2000

Работа выполнена в лаборатории подземной гидродинамики Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор М.Х. Хайруллин.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ю.М. Молокович,

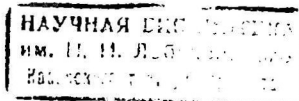
кандидат физико-математических наук,
доцент П.Г. Данилаев.

Ведущая организация: Российский государственный
университет нефти и газа им. И.М. Губкина.

Защита состоится 12 октября 2000 г. в 14 ч. 30 мин. в ауд. физ. 2 на заседании диссертационного совета Д053.29.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по механике при Казанском государственном университете по адресу: 420008, г.Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного университета.

Автореферат разослан 11 сентября 2000 г.



Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент

А.А. Саченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. Одной из важнейших задач подземной газогидродинамики является создание и развитие методов определения коллекторских свойств нефтегазовых пластов, поскольку эффективность проектов разработки и анализ процесса эксплуатации месторождений находится в прямой зависимости от степени изученности пласта.

Проблемы, связанные с интерпретацией на ЭВМ геолого-промысловой информации, приводят к некорректным по Адамару математическим задачам. Математическая постановка многих обратных задач состоит в следующем: по дополнительной информации о решении рассматриваемой задачи требуется определить неизвестную функцию, которая либо является коэффициентом дифференциального уравнения, либо входит в граничные или начальные условия. Решение некорректно поставленных задач становится устойчивым, если наложить на множество допустимых решений некоторые дополнительные ограничения.

Отличительной чертой обратных задач подземной газогидродинамики, связанных с исследованием математических моделей реальных процессов фильтрации в пористых средах, является то, что характер дополнительной информации определяется возможностями промыслового эксперимента. Другим фактором, который необходимо учитывать при решении этих задач, является наличие погрешностей в экспериментальных данных. Таким образом, принципиальное значение приобретают вопросы исследования обратных задач, постановка которых определяется характером эксперимента, и разработка устойчивых методов их решения.

В диссертационной работе рассматриваются задачи определения фильтрационных параметров газовых пластов на основе теории некорректных задач. В качестве исходной информации используются результа-

ты газогидродинамических исследований вертикальных и горизонтальных скважин.

Цель работы. Основными целями работы являются:

- создание численных алгоритмов для определения фильтрационных параметров пористых сред;
- решение с помощью разработанных алгоритмов модельных и практических задач.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- разработан новый вычислительный алгоритм для интерпретации результатов газогидродинамических исследований вертикальных газовых скважин, который учитывает зависимость проницаемости от давления;
- предложена новая методика по интерпретации кривых восстановления давления, снятых с горизонтальных газовых скважин.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием хорошо апробированных исходных математических моделей фильтрации газа в пористой среде, разработкой вычислительных алгоритмов на базе общетеоретических концепций, касающихся некорректных задач, проведением тестовых расчетов и согласием с результатами интерпретации газогидродинамических исследований классическими методами.

Практическая ценность результатов определяется возможностью применения разработанных в диссертации алгоритмов для решения практических задач фильтрации газа в пористой среде.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории подземной гидродинамики ИММ КНЦ РАН, на научных семинарах ИММ КНЦ РАН (г. Казань, 1997-2000 г.г.), на 2-ом Международном семинаре "Горизонтальные скважины" (г. Москва, 1997 г.), на Республиканской научной конференции "Проблемы энергетики" (г. Казань, 1998 г.), на молодежной Школе-конференции, проведенной Математическим центром им.

Н.И. Лобачевского (г. Казань, 1998 г.), на Third Russian - Korean International Symposium on Science and Technology "Korus'99" (Novosibirsk, 1999), на Международной конференции "Современная теория фильтрации" (г. Москва, 1999 г.). В полном объеме диссертация доложена на научном семинаре Института механики и машиностроения КНЦ РАН (г. Казань, 2000 г.), на научном семинаре НИИ математики и механики им. Н.Г.Чеботарева (г. Казань, 2000 г.), на кафедре аэрогидромеханики Казанского государственного университета (г. Казань, 2000 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы (включая 14 таблиц и 34 рисунка) – 104 страницы. Библиографический список состоит из 133 наименований источников отечественных и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации и формулируются основные задачи исследования. Раскрывается научная новизна и практическая ценность. Кратко излагается основное содержание работы по главам.

В первой главе дается обзор и критический анализ литературы, посвященной методам определения фильтрационных свойств пористых сред, кратко излагаются методы интерпретации газогидродинамических исследований пластов и скважин.

Во второй главе приводятся постановки и методы решения обратных коэффициентных задач определения фильтрационных параметров газовых

пластов при нестационарной фильтрации на основе методов регуляризации.

Встречающиеся на практике газовые пласты можно лишь в первом приближении считать однородными. Имеющиеся неоднородности сказываются на кривых изменения давления и, следовательно, на оценках коллекторских свойств пласта. Это могут быть зоны ухудшенной или улучшенной проводимости, тектонические и литологические нарушения, выпадение конденсата в пласте, газоводяной контакт и др.

В этой главе предлагается вычислительный алгоритм на основе методов теории регуляризации, который позволяет оценить фильтрационные свойства призабойной и внешней зон скважины по результатам промыслового эксперимента.

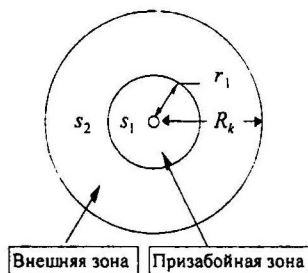


Рис.1. Модель кругового кусочно-однородного пласта.
 r_1 - радиус призабойной зоны, R_k - радиус контура питания.

Задача оценки фильтрационных свойств призабойной и внешней зон ставится следующим образом: на основании данных испытаний скважины (рис.1), исходя из минимума функции

$$J(s_1, s_2) = \int_0^T \left(\phi^2(t) - p^2(r_c, t) \right)^2 dt, \quad (1)$$

где $\phi(t)$ - наблюдаемые значения забойного давления, $p(r_c, t)$ - вычисленные значения забойного давления, когда процесс нестационарной фильтрации газа описывается уравнением:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(s(r) \cdot r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) = \frac{m_0}{p_k} \frac{\partial p^2}{\partial t}, \quad r_c < r < R_k, \quad 0 < t \leq T, \quad (2)$$

с начальным

$$p^2(r, 0) = \theta^2(r) \quad (3)$$

и граничными условиями

$$\pi \frac{H}{p_{am}} \frac{T_{cm}}{T_{nl} \tilde{z}} \left(s(r) \cdot r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_c} = q(t), \quad (4)$$

$$p^2(R_k, t) = p_k^2, \quad (5)$$

где $s(r) = k(r)/\mu$, $k(r)$ - коэффициент проницаемости, μ - коэффициент динамической вязкости газа, m_0 - пористость, p_k - пластовое давление, $\theta(r)$ - начальное распределение давления в пласте, T_{nl} - пластовая температура, T_{cm} - стандартная температура, \tilde{z} - коэффициент сверхсжимаемости газа, R_k - радиус контура питания, r_c - радиус скважины, $q(t)$ - дебит скважины, H - толщина пласта.

Минимизация функционала (1) при условии выполнения (2)-(5) сводится к задаче безусловной минимизации при помощи функционала Лагранжа:

$$G(s_1, s_2) = J(s_1, s_2) + 2\pi \int_0^T \int_{r_c}^{R_k} \left[\psi \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left(s(r) r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) - \frac{m_0}{p_k} \frac{\partial p^2}{\partial t} \right) \right] r dr dt,$$

где $\psi(r, t)$ - множитель Лагранжа. Используя метод малых возмущений и условие стационарности функционала Лагранжа $\delta G(s_1, s_2) = 0$, получены составляющие градиента функционала (1):

$$\frac{\partial I}{\partial s_1} = -2\pi \int_{0}^{\tau} \int_{r_c}^{\eta} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial p^2}{\partial r} r dr dt, \quad \frac{\partial I}{\partial s_2} = -2\pi \int_{0}^{\tau} \int_{\eta}^{R_k} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial p^2}{\partial r} r dr dt, \quad (6)$$

где $\psi(r, t)$ - решение следующей сопряженной задачи:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(s(r) r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = -\frac{m_0}{p_k} \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad r_c < r < R_k, \quad 0 \leq t < T,$$

$$\psi(r, T) = 0,$$

$$2\pi \cdot \left(s(r) \cdot r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_c} = 2(\phi^2(t) - p^2(r_c, t)),$$

$$\psi(R_k, t) = 0.$$

Для решения краевой задачи (2)-(5) и сопряженной задачи используется метод конечных разностей. Конечно-разностные схемы строятся с помощью интегро-интерполяционного метода на неравномерной сетке, которая сгущается к скважине. Итерационный процесс для минимизации функционала (1) строится на основе градиентных методов.

На модельных задачах исследовалось влияние фильтрационных свойств и размеров призабойной зоны на интегральную оценку проницаемости пласта. Численными экспериментами установлено, что при обработке результатов газогидродинамических исследований скважин при обычных условиях, т.е. при не очень большой и не слишком сильно загрязненной призабойной зоне, мы будем получать оценку коэффициента проницаемости внешней зоны.

Результаты интерпретации кривой стабилизации давления (КСД), снятой с вертикальной газовой скважины Д-74, приводятся на рис.2 (модель однородного пласта). Полученная оценка согласуется с результатами, полученными по методикам А.Л.Хейна $k=0.1 \text{ мкм}^2$ и Ю.П.Коротаева ¹ $k=0.15 \text{ мкм}^2$.

¹ Коротаев Ю.П. Избранные труды. М.: Недра, 1996. -Т.1. -301 с.

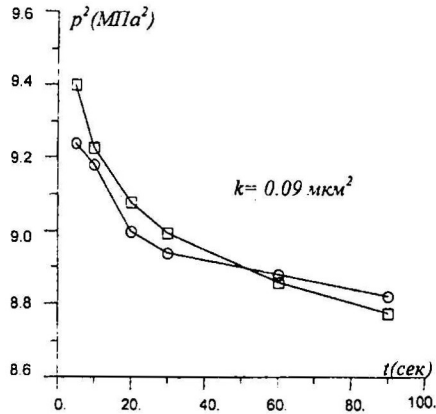


Рис.2. КСД.

○ - реальная кривая, □ - вычисленная кривая.

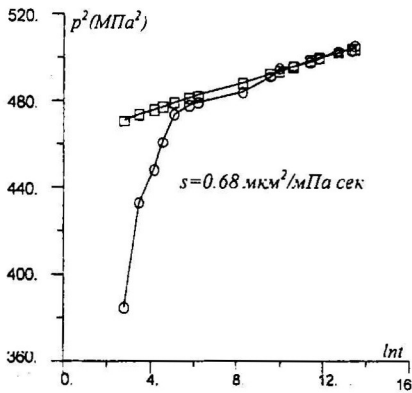


Рис.3. КВД,

однородный пласт,

○-реальная кривая, □ - вычисленная кривая.

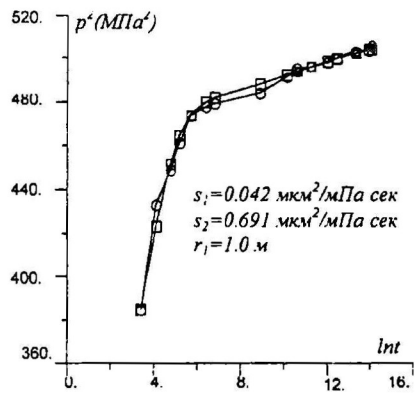


Рис.4. КВД,

неоднородный пласт,

○-реальная кривая, □ - вычисленная кривая.

На рис.3 и 4 приведены результаты интерпретации кривой восстановления давления² по моделям однородного и неоднородного пласта, соответственно. Отклонение начального участка наблюдаемой кривой от вы-

² Гриценко А.И., Алиев З.С., Ермилов О.М., Ремизов В.В., Зотов Г.А. Руководство по исследованию скважин. М.: Наука, 1995.-523 с.

численной (рис.3) свидетельствует об ухудшенных фильтрационных свойствах призабойной зоны.

Далее в этой главе рассматривается обратная коэффициентная задача определения фильтрационных параметров деформируемого газового пласта по результатам газогидродинамических исследований. Численный алгоритм для решения этой задачи строится на основе метода дескриптивной регуляризации, особенностью которого является учет априорных представлений о структуре искомого решения.

Экспериментальные исследования по определению зависимости коэффициента проницаемости пласта от давления показали, что она, как правило, хорошо аппроксимируется монотонными и выпуклыми функциями.³ При решении обратной коэффициентной задачи мы будем искать оценку коэффициента проницаемости в этом классе функций.

Решение данной обратной коэффициентной задачи ищется из минимизации функционала:

$$J(s) = \int_0^T (\phi^2(t) - w(r_c, t))^2 dt, \quad (7)$$

где $\phi(t)$ - наблюдаемые значения забойного давления, $w(r, t) \equiv p^2(r, t)$ - решение следующей краевой задачи:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(s(w) \cdot r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \frac{m_0}{p_k} \frac{\partial w}{\partial t}, \quad r_c < r < R_k, \quad 0 < t \leq T \quad (8)$$

с начальным

$$w(r, 0) = \theta^2(r) \quad (9)$$

и граничными условиями

$$\pi \frac{H}{p_{am}} \frac{T_{cm}}{T_{nl} \bar{z}} \left(s(w) r \frac{\partial w}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_c} = q(t), \quad (10)$$

³ Басниев К.С. Разработка месторождений природных газов, содержащих неуглеводородные компоненты. М.: Недра, 1986.-183 с.

$$w(R_k, t) = p_k^2. \quad (11)$$

Из условия стационарности функционала Лагранжа получено представление

$$(\nabla J, \delta s) = -2\pi \int_0^T \int_{r_c}^{R_k} \delta s \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial w}{\partial t} r dr dt, \quad (12)$$

где $w(r, t)$ - решение задачи (8)-(11), $\psi(r, t)$ - решение сопряженной задачи:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(s \cdot r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial \psi}{\partial r} \left(s'_w \cdot \frac{\partial w}{\partial r} \right) = -\frac{m_0}{p_k} \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad r_c < r < R_k, \quad 0 \leq t < T,$$

$$\psi(r, T) = 0,$$

$$2\pi \cdot \left(s \cdot r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_c} = 2(\phi^2(t) - w(r_c, t)),$$

$$\psi(R_k, t) = 0.$$

Для решения краевой задачи (8)-(11) и сопряженной задачи используется метод конечных разностей. Итерационный процесс для минимизации функционала (7) строится на основе градиентных методов.

На модельных задачах численно исследовалась сходимость предложенного алгоритма в зависимости от погрешности исходной информации.

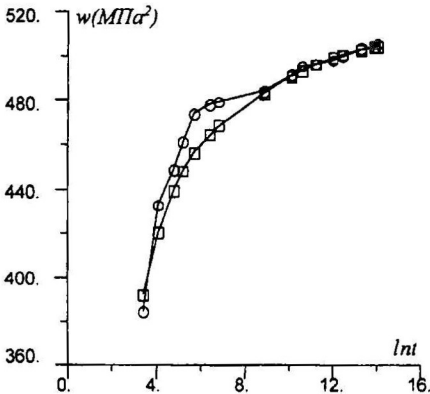


Рис.5. КВД.

о - реальная кривая, □ - вычисленная кривая.

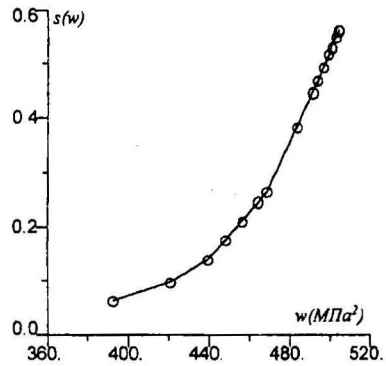


Рис.6. Вычисленная зависимость $s(w)$.

На рис.5,6 приведены результаты интерпретации КВД, которая выше была обработана по модели однородного и неоднородного пласта. График зависимости $s(w)$ согласуется с экспериментальными зависимостями фильтрационных параметров, приведенными в литературе.

В третьей главе рассматриваются постановки и методы решения обратных коэффициентных задач, возникающих при интерпретации геолого-промысловой информации, полученной с горизонтальной скважины (рис.7).

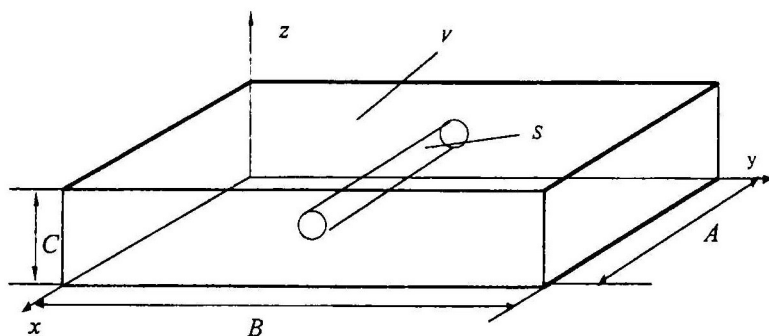


Рис.7. Схема пласта, вскрытого горизонтальной скважиной.

Большинство газонефтяных месторождений имеют слоистое строение, обусловленное особенностями процесса осадконакопления. В слоистых пластах фильтрационные свойства в плоскости слоев отличаются от фильтрационных свойств в направлении, перпендикулярном к слоям, т.е. они являются анизотропными.

Оценки главных значений тензора проницаемости k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} определяются исходя из минимума функционала:

$$J(k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}) = \int_0^T (\phi^2(t) - p_a^2(t))^2 dt, \quad (13)$$

где $\phi(t)$ - наблюдаемые значения забойного давления, $p_*(t)$ - вычисленные значения забойного давления, когда процесс трехмерной фильтрации газа в анизотропном пласте описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{m_0}{p_k} \frac{\partial^2 p}{\partial t} = \left(\frac{k_{xx}}{\mu} \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{k_{yy}}{\mu} \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{k_{zz}}{\mu} \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} \right), \quad 0 < t \leq T, \quad (14)$$

с начальным

$$p^2(x, y, z, 0) = p_0^2(x, y, z) \quad (15)$$

и граничными условиями

$$\left. \frac{\partial p^2}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial p^2}{\partial z} \right|_{z=C} = 0, \quad (16)$$

$$p^2|_{x=0} = p_k^2, \quad p^2|_{x=A} = p_k^2, \quad p^2|_{y=0} = p_k^2, \quad p^2|_{y=B} = p_k^2, \quad (17)$$

$$q(t) = - \int_S \rho \bar{v} d\bar{s}, \quad (18)$$

где ρ - плотность газа, \bar{v} - вектор скорости фильтрации, записанный относительно главной системы координат.

Выражения для составляющих градиента функционала (13) получаются при использовании метода изотропизирующей деформации, метода оптимального управления и имеют вид:

$$\frac{\partial J}{\partial k_{xx}} = - \int_0^T \int_V \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial p^2}{\partial x} dV dt, \quad \frac{\partial J}{\partial k_{yy}} = - \int_0^T \int_V \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial p^2}{\partial y} dV dt, \quad \frac{\partial J}{\partial k_{zz}} = - \int_0^T \int_V \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial p^2}{\partial z} dV dt, \quad (19)$$

где ψ - решение сопряженной задачи:

$$- \frac{m_0}{p_k} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(\frac{k_{xx}}{\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{k_{yy}}{\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{k_{zz}}{\mu} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right), \quad 0 \leq t < T,$$

$$\psi(x, y, z, T) = 0,$$

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{z=C} = 0,$$

$$\psi|_{x=0} = 0, \quad \psi|_{x=A} = 0, \quad \psi|_{y=0} = 0, \quad \psi|_{y=B} = 0,$$

$$-\int_S \vec{v}^* d\vec{s} = 2(\phi^2(t) - p_g^2(t)), \quad \vec{v}^* = \left(-\frac{k_{xx}}{\mu} \frac{\partial \psi}{\partial x}, -\frac{k_{yy}}{\mu} \frac{\partial \psi}{\partial y}, -\frac{k_{zz}}{\mu} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right).$$

Для решения краевой задачи (14)-(18) и сопряженной задачи используется метод конечных разностей. Конечно-разностные схемы строятся с помощью интегро-интерполяционного метода на неравномерной сетке, которая сгущается к скважине. Итерационный процесс для минимизации функционала (13) строится на основе градиентных методов.

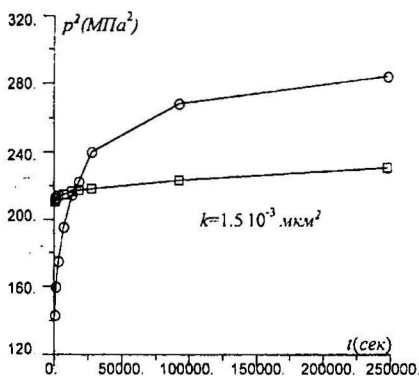


Рис.8. Интерпретация КВД (ГС 3тг, однородный пласт)

о - реальная кривая, □ - вычисленная кривая.

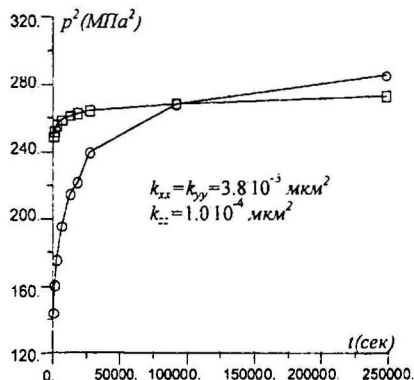


Рис.9. Интерпретация КВД (ГС 3тг, анизотропный пласт).

о - реальная кривая, □ - вычисленная кривая.

Результаты интерпретации газогидродинамических исследований горизонтальной скважины 3тг.⁴ Оренбургского газоконденсатного месторождения для модели однородного и анизотропного пласта приводятся на рис.8,9, соответственно.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

⁴ Черных В.А. Гидрогазодинамика горизонтальных газовых скважин. М. ВНИИГАЗ, 1999.-189с.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработан новый вычислительный алгоритм для интерпретации результатов газогидродинамических исследований вертикальных газовых скважин, который учитывает зависимость проницаемости от давления.

2. Предложена новая методика по интерпретации результатов газогидродинамических исследований горизонтальной скважины на основе методов регуляризации.

3. Исследовано влияние состояния призабойной зоны вертикальной газовой скважины на оценки фильтрационных параметров пласта по кривой восстановления давления.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Басниев К.С., Кульпина Н.М., Хайруллин М.Х., Садовников Р.В., Гайнетдинов Р.Р. Обработка результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин при нестационарной фильтрации. // Тезисы докладов 2-го Международного семинара "Горизонтальные скважины". - М.: 1997. -С.70-71.
2. Садовников Р.В., Гайнетдинов Р.Р. Об определении параметров нефтяного пласта по данным восстановления давления в остановленной горизонтальной скважине. // Институт механики и машиностроения КНЦ РАН, Казань, 1998 - 7 с.: ил. - Рус. - Деп. в ВИНТИ, 20.04.98, № 1167-В98.
3. Садовников Р.В., Гайнетдинов Р.Р. Интерпретация гидродинамических исследований пластов на основе теории некорректных задач. //Материалы докладов Республиканской научной конференции "Проблемы энергетики", ч.3, Казань, 1998. -С.11.

4. Гайнетдинов Р.Р., Садовников Р.В. Интерпретация результатов гидродинамических исследований для горизонтальной скважины в трещиновато- пористом пласте. // Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского. Казанское математическое общество. Казань, "УНИПРЕСС", 1998. -С.85-87.
5. Гайнетдинов Р.Р., Шамсиев М.Н. Оценка фильтрационных параметров газовых пластов методом итерационной регуляризации. // Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского. Казанское математическое общество. Казань, "УНИПРЕСС", 1998. -С.88-90.
6. Gainetdinov R. Identification of filtration parameters of the gas reservoirs. Abstracts of the Third Russian - Korean International Symposium on Science and Technology "Korus'99", Novosibirsk, 1999, v.1, p. 46.
7. M.Kh.Khairullin, M.N.Shamsiev, R.V.Sadovnikov, R.R.Gainetdinov. Interpretation of hydrodynamic well investigations on the basis of theory of ill-posed problems. Abstracts of the International Conference dedicated to P.Ya.Polubarinova-Kochina "Modern approaches to flows in porous media". Moscow, 1999, p.153-155.
8. Р.Х. Муслимов, М.Х. Хайруллин, М.Н. Шамсиев, Р.Р. Гайнетдинов, Р.Г. Фархуллин. Интерпретация кривой восстановления давления на основе теории регуляризации. // Нефтяное хозяйство, № 11, 1999. - С.19-20.

200